

УДК 524.314

ИССЛЕДОВАНИЕ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА АТМОСФЕР НОРМАЛЬНЫХ И ПЕКУЛЯРНЫХ А–F-ЗВЕЗД

*О.А. Аль-Хави, И.Ф. Бикмаев, С.С. Мельников,
М.И. Бикмаева, Н.А. Сахибуллин*

Аннотация

В работе приведены результаты расчетов химического состава атмосфер группы звезд спектральных классов А–F. Исследуемая группа состоит из звезд главной последовательности и сверхгигантов в диапазоне температур 6000–9000 К. Выполнен анализ содержания 25 химических элементов в зависимости от атомного номера. Сделано заключение о неоднородности аномалий химического состава атмосфер А-звезд с эффективными температурами $T_{\text{eff}} = 7000\text{--}9000$ К. Показано отсутствие химических пекулярностей в атмосферах F-сверхгигантов (подобных наблюдаемым в Am-звездах), свидетельствующее об их исчезновении в турбулентных атмосферах.

Ключевые слова: звезды спектральных классов А–F, химический состав атмосфер.

Введение

Определение химического состава звездных атмосфер является одним из ключевых инструментов в исследовании звездного нуклеосинтеза, эволюции вещества в Галактике, в проверке теорий звездной эволюции. Подавляющая часть звезд Галактики принадлежит звездам главной последовательности на диаграмме Герцшпрунга–Рессела в диапазоне спектральных классов А–F–G–K. Продукты ядерного нуклеосинтеза, образующиеся в недрах звезд главной последовательности, не проявляют себя в их атмосферах вплоть до перехода звезд на стадию гигантов и сверхгигантов. Поэтому предполагается, что химический состав атмосфер звезд главной последовательности отражает химический состав газо-пылевого вещества, из которого они сформировались. Такой подход при исследовании химического состава атмосфер старых (5–12 млрд лет) G–K-звезд позволяет исследовать процессы химической эволюции вещества Галактики, начиная с ранних стадий ее пространственной, динамической и кинематической эволюции (звезды гало, толстого и тонкого дисков). Звезды главной последовательности спектральных классов А–F в диапазоне эффективных температур 7000–9000 К принадлежат относительно более молодому населению Галактики (1–3 млрд лет). Очевидно, что исследование химического состава их атмосфер может дать ценную информацию о веществе Галактики на более поздних стадиях ее эволюции. К сожалению, среди звезд спектральных классов А и ранних подклассов F подавляющими по числу оказываются звезды с пекулярным химическим составом, который не может быть объяснен в рамках химической эволюции Галактики. Пекулярности химического состава, вызванные физическими условиями в звездных атмосферах, должны быть количественно установлены и отделены от реальных эффектов синтеза химических элементов в недрах звезд и эволюции вещества в Галактике.

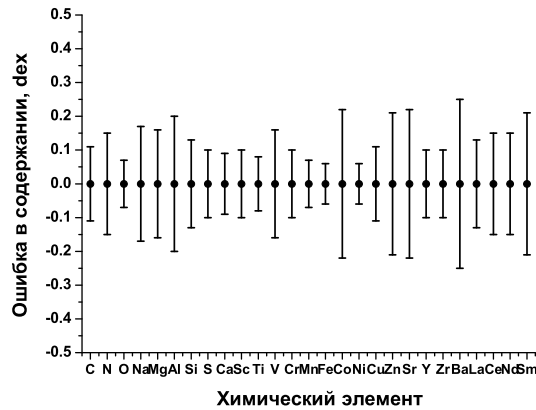


Рис. 1. Ошибки определения содержания химических элементов

В работе [1] были определены фундаментальные параметры атмосфер группы А–F-звезд. В настоящей работе выполнены расчеты и анализ химического состава для 13 звезд этой группы.

1. Расчеты содержания химических элементов

Расчеты содержания выполнены с использованием программы WIDTH и сетки моделей атмосфер Куруца [2] с параметрами атмосфер, определенными в работе [1]. Интерполяция из узлов сетки моделей на конкретные значения параметров атмосфер (T_{eff} , $\log g$) была выполнена с помощью программы В.Ф. Сулейманова и В.В. Шиманского, описанной в статье [3]. В программе WIDTH содержание элемента определяется как логарифм числа атомов данного элемента по отношению к общему числу элементов, принятому за единицу. В нашей работе использованы атомные данные из Венской базы данных VALD [4], в которой собраны наиболее надежные экспериментальные силы осцилляторов для большинства линий атомов и ионов, представленных в спектрах исследованных нами звезд. Обработка эшелле-спектров высокого разрешения была выполнена с помощью системы обработки спектров DECH [5]. В спектре каждой звезды были измерены эквивалентные ширины, в среднем, 400 спектральных линий, принадлежащих 25 химическим элементам. В качестве стандартного содержания был принят солнечный химический состав из работы [6].

Для одной из звезд программы (2 UMa, $T_{\text{eff}} = 7900$ K, $\log g = 4.1$, $V_{\text{micro}} = 3$ км/с) были выполнены расчеты содержаний для нескольких моделей атмосфер с фундаментальными параметрами, отличающимися на величину ошибок их определения. Это позволило оценить ошибки расчетов содержания для каждого из 25 элементов в зависимости от числа линий, измеренных в спектре звезды.

На рис. 1 показаны вероятные ошибки определения содержания для отдельных химических элементов. По оси абсцисс представлены химические элементы в порядке возрастания атомного номера, а по оси ординат показана ошибка содержания в шкале десятичных логарифмов (dex).

2. Химический состав F-звезд главной последовательности

На рис. 2 показан химический состав двух F-звезд главной последовательности 41 Ser и 99 Her. Здесь и на последующих рисунках по оси ординат отложено содержание каждого элемента по отношению к стандартному солнечному содержанию

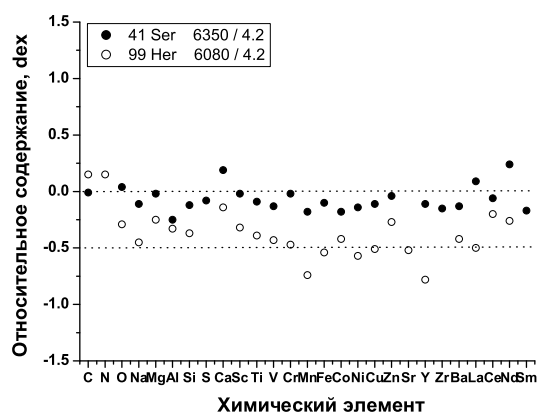


Рис. 2. Содержание химических элементов в F-звездах главной последовательности

в шкале десятичных логарифмов (dex), то есть значение 0 соответствует солнечному содержанию, значение $+1$ – избытку элемента на один порядок относительно солнечного содержания, а значение -1 – дефициту на один порядок. На рисунках около названия звезды указаны значения эффективной температуры и ускорения силы тяжести. Химический состав звезды 41 Ser в пределах случайных ошибок определения практически совпадает с солнечным. Звезда 41 Ser принадлежит к тонкому диску Галактики. Этот результат является важным и с практической точки зрения, так как звезда 41 Ser может быть использована в дальнейших исследованиях в качестве звезды-стандарта солнечного содержания в диапазоне эффективных температур, соответствующих F-звездам.

Атмосфера звезды 99 Her имеет химический состав, отличный от солнечного. Элементы группы железа (V, Cr, Mn, Fe, Ni, Cu) имеют пониженное содержание в пределах $-0.35 \dots -0.55$ dex. У легких элементов (C, O, Si) и элемента альфа-процесса Ca наблюдается избыток относительно железа на $+0.2 \dots +0.5$ dex. У элементов s- и r-процессов (Ba, La, Ce, Nd) также присутствует избыток относительно железа в пределах $+0.2 \dots +0.3$ dex. По своему химическому составу звезда 99 Her относится к толстому диску Галактики.

Наши результаты по определению химического состава 41 Ser и 99 Her согласуются с выводами теории эволюции звезд толстого и тонкого дисков Галактики [7]. Химический состав их атмосфер отражает содержание элементов в межзвездной среде, из которой образовались эти звезды.

3. Химический состав A-звезд главной последовательности

На рис. 3 показан химический состав трех A-звезд главной последовательности в узком диапазоне эффективных температур 7000–7350 К. Видно, что при близких эффективных температурах у этих звезд сильно различаются содержания элементов. Звезда HD 32115 имеет тот же химический состав, что и Солнце. У звезды 28 And имеется дефицит элементов, подобный тому, что и у звезды 99 Her. А у звезды Тау UMa наблюдается систематический тренд увеличения содержания с увеличением атомного номера химического элемента. Этот тренд характерен для атмосфер металлических Am-звезд и может быть объяснен эффектами сепарации элементов из-за светового давления и гравитационной диффузии атомов и ионов [8].

На рис. 4 показан химический состав двух A-звезд главной последовательности в диапазоне эффективных температур 7670–7900 К. Видно, что эти звезды имеют

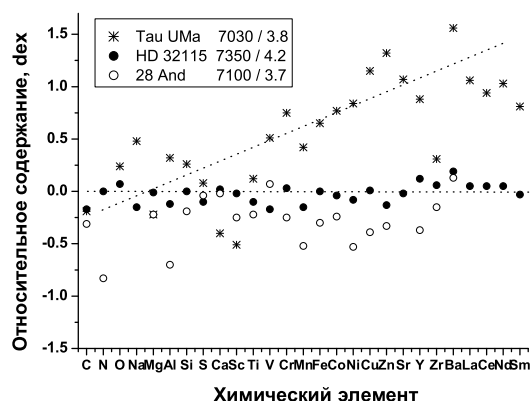


Рис. 3. Содержание химических элементов в А-звездах в диапазоне температур 7000–7350 К

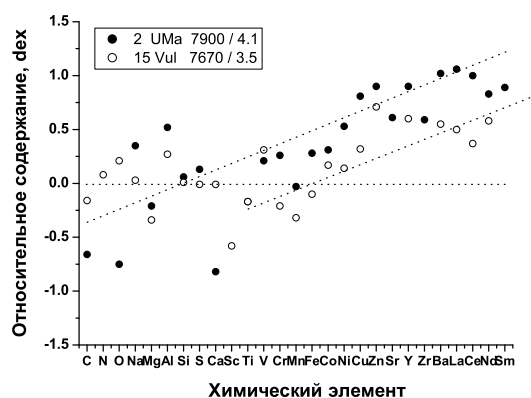


Рис. 4. Содержание химических элементов в А-звездах в диапазоне температур 7670–7900 К

содержания элементов, сходные с тем, что наблюдается для звезды *Tau UMa*, но при близких эффективных температурах амплитуды избытка элементов у них систематически различаются на полпорядка по содержанию. У звезды *15 Vul* наблюдается солнечное содержание легких элементов и элементов железного пика. Лишь для наиболее тяжелых элементов выявлены значительные избытки содержания.

На рис. 5 показан химический состав трех А-звезд главной последовательности в диапазоне эффективных температур 8500–9000 К. Видно, что две звезды (*68 Tau* и *60 Leo*) имеют те же содержания элементов, что и звезда *Tau UMa* ($T_{\text{eff}} = 7030$ К).

Химический состав звезды *58 Dra* ($T_{\text{eff}} = 8500$ К) сходен с составом звезды *15 Vul* ($T_{\text{eff}} = 7670$ К) – солнечное содержание легких элементов и элементов железного пика, лишь для наиболее тяжелых элементов наблюдаются значительные избытки содержания.

Как указано выше, нарастающий избыток содержания химических элементов с увеличением атомного номера, наблюдаемый для большинства исследованных А-звезд, может быть объяснен эффектами сепарации элементов из-за светового давления и гравитационной диффузии атомов и ионов, описанными в работе [8]. Однако теория Мишо лишь в общем виде способна объяснить подобный вид кривой распространенности. Нерешенной проблемой является отсутствие корреляции

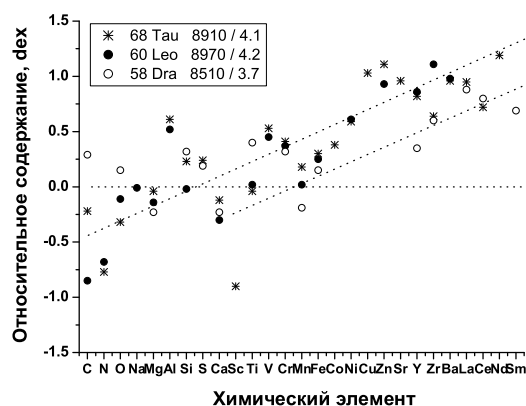


Рис. 5. Содержание химических элементов в А-звездах в диапазоне температур 8500–9000 К

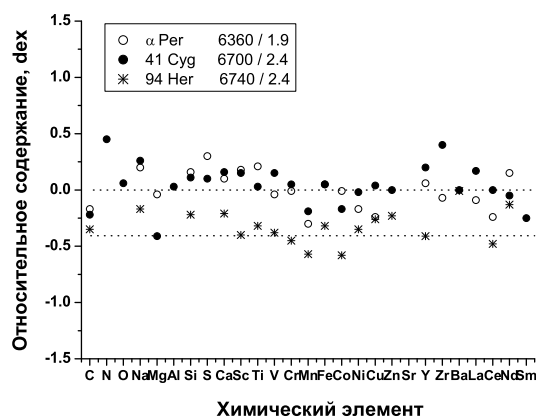


Рис. 6. Содержание химических элементов в F-сверхгигантах

амплитуды пекулярностей химического состава с температурой, то есть А-звезды с близкими эффективными температурами имеют сильно различающийся химический состав (см. рис. 3). И наоборот, у А-звезд с сильно отличающимися эффективными температурами (Тав UMa, 68 Тав) наблюдаются сходные и большие амплитуды пекулярностей.

4. Химический состав F-сверхгигантов

На рис. 6 показан химический состав трех F-сверхгигантов. Химический состав α Per и 41 Cyg в пределах случайных ошибок определения практически совпадает с солнечным. В атмосфере звезды 94 Her наблюдается дефицит химических элементов подобно тому, что и у звезд 99 Her и 28 And. В стадию F-сверхгигантов попадают А–В-звезды после ухода с главной последовательности. Отсутствие пекулярностей в атмосферах F-сверхгигантов, подобно наблюдаемым в Am-звездах, свидетельствует об их исчезновении в турбулентных атмосферах. Таким образом, пекулярности содержания в атмосферах Am-звезд вызваны не химическими причинами, а какими-то физическими условиями формирования спектральных линий атомов и ионов.

5. Выводы

В работе выполнено определение содержаний 25 химических элементов в атмосферах 13 А–F-звезд в диапазоне эффективных температур 6000–9000 К. Показан неоднородный характер проявления пекулярностей химического состава в атмосферах А-звезд в диапазоне температур 7000–9000 К. Атмосферы F-сверхгигантов не имеют пекулярностей химического состава, подобно тому, что наблюдается для Am-звезд. Это указывает на исчезновение пекулярностей в турбулентных атмосферах сверхгигантов.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 13-02-00351-а).

Summary

O.A. Al-Hawi, I.F. Bikmaev, S.S. Melnikov, M.I. Bikmaeva, N.A. Sakhibullin. Study of the Atmospheric Chemistry of Normal and Peculiar A–F-Stars.

In this work, we determine the chemical composition of the atmospheres of the group of 13 A–F-stars. The group consists of main sequence and supergiant stars in the temperature range of 6000–9000 K. We analyze the chemical abundance patterns for 25 elements depending on atomic number. In conclusion, we state the non-uniform nature of chemical peculiarities in the atmospheres of Am-stars in the temperature range of 7000–9000 K and show that there are no chemical peculiarities (similar to Am-stars) in the atmospheres of F-supergiants, which indicates that they are disappearing in the turbulent atmospheres.

Keywords: A–F-type stars, chemical composition of atmospheres.

Литература

1. Аль-Хави О.А., Бикмаев И.Ф., Мельников С.С. Бикмаева М.И., Сахибуллин Н.А. Определение фундаментальных параметров атмосфер группы А–F-звезд // Учен. зап. Казан. ун-та. Сер. Физ.-матем. науки. – 2013. – Т. 155, кн. 2. – С. 184–188.
2. Kurucz R.L. ATLAS9 Stellar Atmospheres Programs and 2 km/s Grid (CD-ROM). – Cambridge: Smithsonian Astrophys. Observ., 1993.
3. Сулейманов В.Ф. Могут ли наблюдаться абсорбционные линии в оптических спектрах рентгеновских Новых? // Письма в Астрон. журн. – 1996. – Т. 22. – С. 107–123.
4. Piskunov N.E., Kupka F., Ryabchikova T.A., Weiss W.W., Jeffery C.S. VALD: The Vienna Atomic Line Data Base // Astron. Astrophys. Suppl. – 1995. – V. 112. – P. 525–535.
5. Галазутдинов Г.А. Система обработки звездных эшелле-спектров. I. Обработка изображений. II. Обработка спектров. Препринт № 92. – Нижний Архыз: CAO РАН, 1992. – 52 с.
6. Grevesse N., Sauval A.J. Standard solar composition // Space Sci. Rev. – 1998. – V. 85, No 1–2. – P. 161–174.
7. Soubiran C., Girard P. Abundance trends in kinematical groups of the Milky Way's disk // Astron. Astrophys. – 2005 – V. 438, No 1. – P. 139–151.
8. Michaud G. Diffusion processes in peculiar A stars // Astrophys. J. – 1970. – V. 160. – P. 641–658.

Поступила в редакцию
23.04.13

Аль-Хави Омар А. Абдулнаби – аспирант кафедры астрономии и космической геодезии, Казанский (Приволжский) федеральный университет, г. Казань, Россия.

E-mail: *omaralsamarrai@yahoo.com*

Бикмаев Ильфан Фяритович – доктор физико-математических наук, профессор кафедры астрономии и космической геодезии, Казанский (Приволжский) федеральный университет, г. Казань, Россия.

E-mail: *ibikmaev@yandex.ru*

Мельников Сергей Сергеевич – научный сотрудник кафедры астрономии и космической геодезии, Казанский (Приволжский) федеральный университет, г. Казань, Россия.

E-mail: *smelnikovs@rambler.ru*

Бикмаева Мадина Ильфановна – аспирант кафедры астрономии и космической геодезии, Казанский (Приволжский) федеральный университет, г. Казань, Россия.

E-mail: *sirius2013@yandex.ru*

Сахибуллин Наиль Абдуллович – доктор физико-математических наук, заведующий кафедрой астрономии и космической геодезии, Казанский (Приволжский) федеральный университет, г. Казань, Россия.

E-mail: *Nail.Sakhibullin@kpfu.ru*